doi:10.13866/j.azr.2019.06.19

5种盐生植物生物炭产率及其理化性质①

毛明月[1,2]， 赵振勇[1]， 王守乐[1,2]， 田长彦[1]， 张 科[1]，
宫江平[3]， 张 正[3]， 荆卫民[1]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 克拉玛依市建筑规划设计（院）有限公司，新疆 克拉玛依 834000）

摘 要： 为了解不同盐生植物生物炭特性的种间差异，特选用盐地碱蓬（*Suaeda salsa*）、盐角草（*Salicornia europaea*）、高碱蓬（*Suaeda altissima*）、野榆钱菠菜（*Atriplex aucheri*）、盐穗木（*Halostachys caspica*）5种藜科盐生植物为研究对象，于500 ℃温度下炭化制备生物炭，通过理化性质分析，并结合主成分分析来探讨盐生植物原材料对生物炭特性差异的影响。结果表明：生物炭的产率受盐生植物原材料灰分含量影响。此外，生物炭灰分、养分及阳离子含量受盐生植物原材料物质成分的影响。炭化能显著增加生物质灰分含量，5种生物炭灰分含量与原材料相比增加了67.22%～169.24%，同时伴随着灰分增加，水溶性 Na^+、K^+ 等低价离子富集，pH、电导率（*EC*）增大，碱性增强。本研究为盐生植物生物炭在改良酸性土壤、炭化原材料选择等方面提供基础数据及理论参考。

关键词： 盐生植物；生物炭；产率；灰分；理化性质

生物炭是指植物或其他生物质在缺氧或者无氧的条件下，经过高温（300～700 ℃）炭化后，所产生的固态物质，它呈黑色，具有高浓度的碳含量，较高的pH值[1-2]。我国南方地区分布着大面积的酸性土壤，此类土壤中淋溶作用强烈，K^+、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等盐基养分含量低，酸度高，使得土壤阳离子交换量（CEC）减小，保肥能力下降，进而导致作物产量降低[3]，严重威胁粮食安全及农田可持续发展[4]。研究表明，添加生物炭后，土壤pH、电导率（*EC*）、土壤CEC[5-7]、保水能力[8]等都有所提高，施用生物炭可有效提升农作物产量[9]。因此，生物炭既是很好的生物炭基肥料，又是酸性土壤的调节剂[10]。

生物炭的理化性质决定其在土壤中的效应。生物炭的性质不仅与炭化工艺有着密切的联系[11-12]，而且受生物炭原材料的影响[13-14]。制备生物炭的原材料包括各种天然物质及其衍生物，如木屑、农业和工业活动产生的有机废弃物、城市固体垃圾、畜禽粪便、水生植物和藻类等[15]。目前，生物炭生产工艺研究较多，并取得可观成果，但即使炭化工艺相同，不同原材料生物炭也存在差异，进而会影响其应用领域，这为炭化过程中原材料的最优选择带来了不确定性。另外，现有研究大多集中于对甜土植物生物炭的研究，对于盐生植物制备生物炭的研究还鲜有报道。

盐生植物是生长在盐碱土壤中的一类天然植物，耐盐性强，且能产生可观的生物量[16]。与非盐生植物[17-18]相比，盐生植物具有高灰分、高盐基离子含量等特点。合理利用盐生植物资源，对盐碱土资源开发，农作物增收以及生态环境条件改善具有非常重要的推动作用[19]。近年来，通过生物质热裂解炭化技术将农业废弃物转化为生物炭，并应用于环境修复和土壤改良等领域，这也为提高盐生植物资源的有效利用提供了新的契机。

为此，本研究选取新疆5种典型的盐生植物：盐地碱蓬（*Suaeda salsa*）、盐角草（*Salicornia europaea*）、高碱蓬（*Suaeda altissima*）、野榆钱菠菜（*Atriplex aucheri*）、盐穗木（*Halostachys caspica*）为材料，在500 ℃下进行裂解反应，研究盐生植物原材料对生物炭差异的影响，为后续盐生植物生物炭的制备和对酸性土壤改良等方面提供基本依据。

① **收稿日期：** 2018-12-19； **修订日期：** 2019-06-10
基金项目： 国家重点研发计划课题（2016YFC0501403）；克拉玛依市科技局项目（SK2016-05）；新疆油田公司科技项目"碳汇林基地盐碱地种植改良技术试验与推广"；荒漠植物在城市景观中的应用推广（2017HM002B）资助
作者简介： 毛明月（1991-），男，硕士研究生，研究方向为盐生植物开发与利用. E-mail：maomingyue0324@163.com
通讯作者： 田长彦. E-mail：tianchy@ms.xjb.ac.cn

1 材料与方法

实验所用盐地碱蓬、盐角草、高碱蓬、野榆钱菠菜、盐穗木均取自克拉玛依农业综合开发区盐生植物园。克拉玛依农业综合开发区位于克拉玛依市东南 10 km 的准噶尔盆地西北边缘湖积平原上,植物生长地区 0 ~ 30 cm 土层盐分为 15.28 ~ 23.05 g · kg^{-1}。实验用盐生植物滴灌方式灌溉,滴灌带布设采用"一管一行",间距 1 m。上述 5 种植物分别条播于滴灌带两侧 20 cm 范围内,形成 40 cm 宽播种带,并定期灌水。在 8 月中旬前后,即盐地碱蓬、盐角草、高碱蓬、野榆钱菠菜、盐穗木地上部生物量累积最佳期[20],刈割地上部分。

1.1 生物炭制备

生物炭制备采用高温裂解法[21-22]。将风干的盐生植物样品切成 2 ~ 3 cm,在 65 ℃的烘箱中烘干备用。称取一定量烘干后盐生植物,置于坩埚中并压实加盖,在马弗炉(型号:SX2 - 4 - 10)中于 500 ℃炭化 2 h[19,23-24]。炭化完成测定产量后,粉碎过 2 mm 筛,分析测定其理化特性。每个处理 3 次重复。

1.2 分析方法

(1) 生物炭产率 $= \dfrac{\text{生物炭质量(g)}}{\text{盐生植物干物质质量(g)}} \times 100\%$

(2) pH、*EC* 以及水溶性离子测定:生物炭 0.40 g(<2 mm)于 200 mL 无 CO_2 蒸馏水中振荡 30 min,取过滤后的上清液用于测定。当天测定浸出液的 pH(用精密 pH 计测定),电导率(*EC*)(用电导率仪测定)。K^+ 和 Na^+ 用火焰光度计测定,Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用电感耦合等离子发射光谱(美国安捷伦 735 ICP-OES)测定。

(3) 全碳:采用总有机碳分析仪测定。

(4) 全量氮磷钾:①消解:浓硫酸 + 高氯酸;②全氮用全自动定氮仪测定,全磷用钼锑抗比色法测定,全钾用原子吸收法测定。

(5) 灰分:按照《土壤农化分析》测定[25]。

1.3 数据统计与分析

所有数据均为 3 次重复的平均值,用 SPSS 19.0 软件单因素方差分析(ANOVA)进行差异显著性比较、Excel 2013 及 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同种盐生植物的理化组成

从表 1 可以看出,5 种盐生植物原材料不同理化特性之间存在差异。5 种盐生植物含有较高的灰分含量(7.51% ~35.68%),其中,盐角草灰分含量(35.68%)和盐基离子总量显著高于其他 4 种盐生植物。

2.2 影响盐生植物生物炭产率的因素

通过 5 种盐生植物原材料的 11 种理化指标(pH、*EC*、木质素、灰分、全碳、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+、全氮、全磷)的主成分分析发现,第一主成分特征值达到 8.23,方差解释量达到 74.81%,前 3 个主成分累积方差解释量也高达 99.32%。根据第一、第二主成分载荷值大小,将这 11 个指标划分为 3 类,其中第一类包含木质素、全碳,第二类为灰分、全磷、全氮、*EC*、Na^+、K^+,第三类为 pH、Ca^{2+}、Mg^{2+}。第一主成分载荷绝对值在 0.21 ~ 0.35,但是第一类为负,其余 2 类为正,说明第一类与第二、第三类相比,对生物炭的产率等作用存在差异性(图 1)。鉴于木质素主要由 C、H、O 组成,并且原材料中灰分含量决定了其元素、离子、*EC*、pH 值的大小,再结合主成分分析,因此将着重分析原材料木质素及灰分含量对生物炭产率的影响。

通过对原材料灰分含量、原材料木质素含量与生物炭的产率对比分析发现,生物炭产率与原材料

表 1 5 种盐生植物理化性质

Tab. 1 Physiochemical properties of five halophyte species

原材料	pH	*EC* /(mS · cm^{-1})	木质素 /%	灰分含量 /%	全碳 /%	Ca^{2+} /(g · kg^{-1})	K^+ /(g · kg^{-1})	Mg^{2+} /(g · kg^{-1})	Na^+ /(g · kg^{-1})	全氮 /(g · kg^{-1})	全磷 /(g · kg^{-1})	全钾 /(g · kg^{-1})
盐地碱蓬	5.95a	647.33c	28.59b	18.77c	34.83d	3.10a	7.07d	11.88a	46.67c	9.15b	0.34d	6.84d
盐角草	5.96a	1 236.67a	16.73c	35.68a	26.23e	3.06a	11.95a	12.38a	117.50a	13.92a	0.98b	11.35a
高碱蓬	5.49b	330.67d	38.56a	10.74d	40.81b	0.70bc	9.75b	1.03b	28.28d	4.42d	0.46c	11.81a
野榆钱菠菜	5.52b	244.33e	37.12a	7.51e	42.77a	0.38c	6.84d	0.91b	20.82e	6.31c	0.45c	8.55c
盐穗木	5.79ab	880.67b	30.79b	30.02b	36.15c	1.67b	8.19c	1.31b	102.37b	14.73a	1.35a	9.76b

注:*EC* 为电导率。同列不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

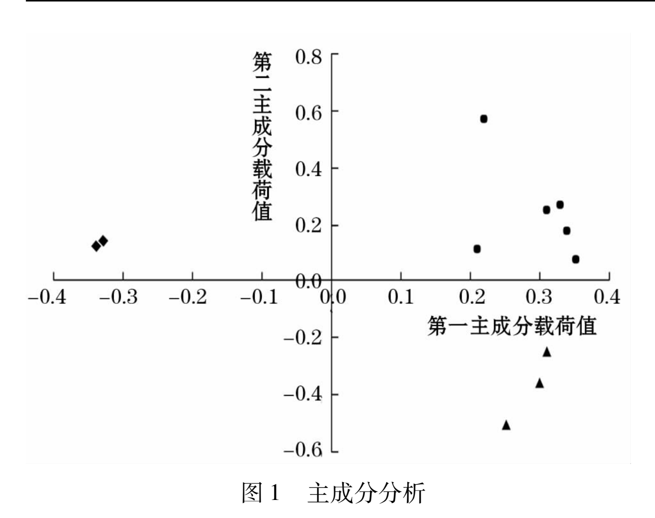


图 1 主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis

木质素含量呈现负相关关系(图 2a,$P<0.01$),而与原材料灰分含量呈正相关关系(图 2b,$P<0.01$)。5 种盐生植物原材料灰分含量依次为:盐角草 > 盐穗木 > 盐地碱蓬 > 高碱蓬 > 野榆钱菠菜,彼此之间灰分含量差异显著(表 1,$P<0.05$),所制备的生物炭产率在 29.41% ~49.99%;5 种生物炭产率依次为:盐角草 > 盐穗木 > 盐地碱蓬 > 高碱蓬 > 野榆钱菠菜(表 2,$P<0.05$),盐角草生物炭产率(49.99%)显著高于其他 4 种($P<0.05$)。

2.3 不同种盐生植物理化组成与生物炭灰分及碳含量的关系

盐生植物原材料本身的灰分含量高,生物炭灰

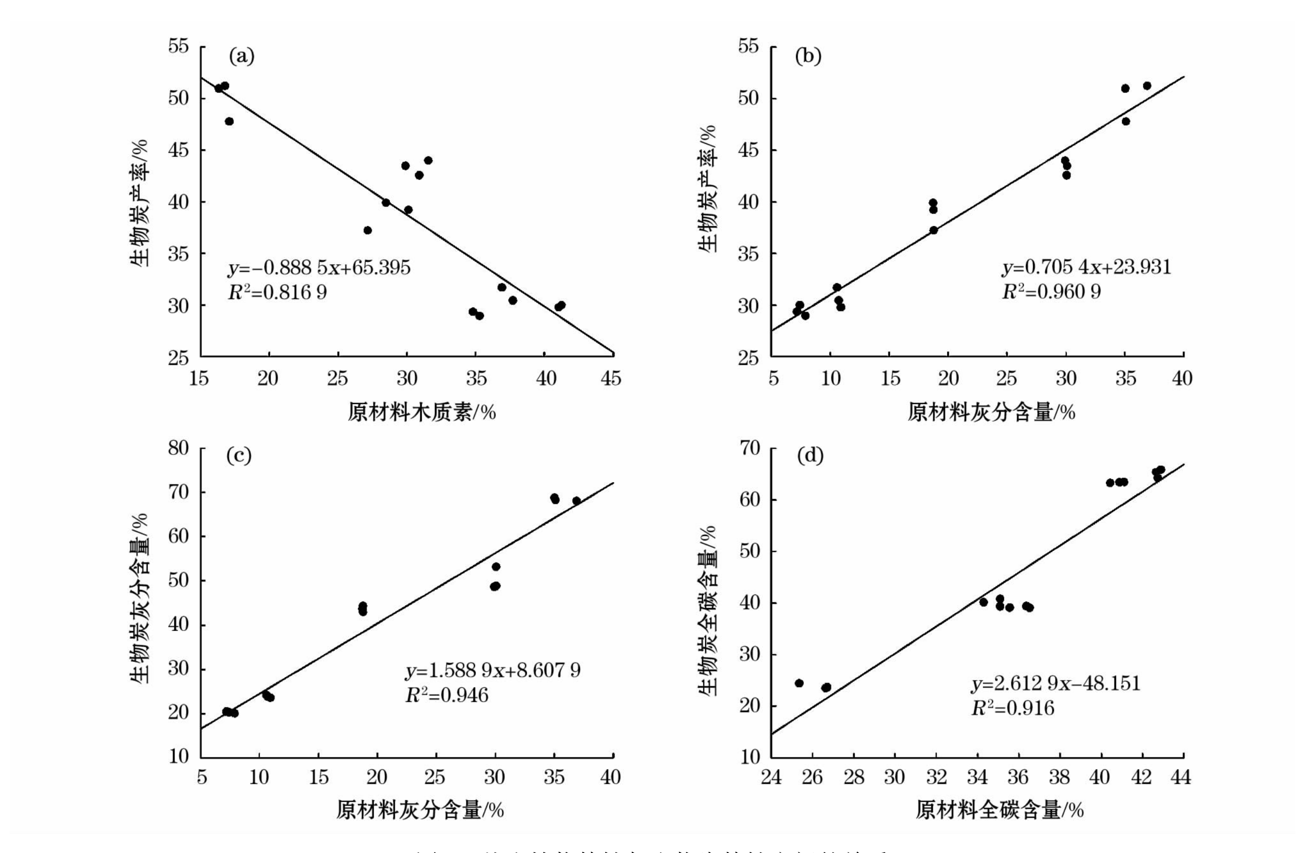


图 2 盐生植物特性与生物炭特性之间的关系

Fig. 2 Relationship between lignin ash content of raw material and biochar properties

分含量也相应较高,为显著正相关关系(图 2c,$P<0.01$)。盐角草、盐穗木原材料灰分含量较高,分别为 35.68%、30.02%,盐地碱蓬原材料灰分含量为 18.77%,而高碱蓬、野榆钱菠菜原材料灰分含量仅为 10.74%、7.51%,5 种原材料间灰分含量均达到差异性水平(表 1,$P<0.05$)。与之相对应生物炭灰分含量为:盐角草生物炭 > 盐穗木生物炭 > 盐地碱蓬生物炭 > 高碱蓬生物炭 > 野榆钱菠菜生物炭。盐角草生物炭灰分含量最高为:68.37%;盐穗木生物

表 2 生物炭产率及其理化特性

Tab. 2 Biochar yields and physiochemical properties

生物炭	产率 /%	灰分含量 /%	全碳 /%	pH	*EC* /(mS·cm^{-1})
盐地碱蓬	38.77c	43.63c	40.07c	10.16b	1.27c
盐角草	49.99a	68.37a	23.87d	10.28ab	2.08a
高碱蓬	30.62d	23.82d	63.35b	10.01c	0.81d
野榆钱菠菜	29.41d	20.22e	65.16a	9.87d	0.58e
盐穗木	43.33b	50.20b	39.17c	10.37a	1.88b

炭灰分含量稍低为:50.20%;盐地碱蓬生物炭灰分含量为 43.63%;而高碱蓬生物炭、野榆钱菠菜生物炭灰分含量仅为 23.82%、20.22%,5 种生物炭间灰分含量同样均达到显著差异性水平(表 2,$P<0.05$)。原材料碳含量决定了生物炭碳含量的保有量,原材料本身的碳含量高,生物炭碳含量也相应较高(图 2d,$P<0.01$)。野榆钱菠菜原材料全碳含量达 42.77%,显著高于其他 4 种原材料($P<0.05$),其所制备的生物炭全碳含量 65.16%,同样显著高于其他 4 种生物炭(表 2,$P<0.05$);盐角草生物炭全碳含量最低(23.87%),显著低于其他 4 种生物炭。

生物炭灰分含量与原材料相比有所增加(表 1,表 2)。盐地碱蓬生物炭增加了 132.45%、盐角草生物炭增加了 91.62%、高碱蓬生物炭增加了 121.79%、野榆钱菠菜生物炭增加了 169.24%、盐穗木生物炭增加了 67.22%。生物炭灰分含量越高,相应的生物炭产率也越高(图 3a,$P<0.01$)。另外,生物炭灰分含量越高,碳含量越低,呈现显著负相关关系(图 3b,$P<0.01$)。

生物炭 pH、*EC* 值比原材料有所提高。生物炭 pH 大都在 10 以上,比原材料 pH 增加了 70.76% ~ 82.33%;生物炭 *EC* 值高达 0.58 ~2.08 $mS\cdot cm^{-1}$,比原材料 *EC* 值增加了 68.19% ~144.96%,5 种生物炭 *EC* 值差异明显,盐角草生物炭 *EC* 值显著高于其他 4 种生物炭。炭化增加盐生植物原材料 pH、*EC* 主要是炭化增加了原材料灰分含量,矿质元素如 Na、K、Ca、Mg 等以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中,溶于水后呈碱性,且灰分含量越高,碱性越强、*EC* 值越大(图 3c、图 3d,$P<0.01$)。

2.4 不同种盐生植物理化组成与生物炭阳离子及全量氮磷钾含量的关系

原材料阳离子含量决定生物炭中阳离子含量的保留情况(图 4)。盐地碱蓬、盐角草原材料水溶性 Ca^{2+} 含量较高,为 3.10 $g\cdot kg^{-1}$、3.06 $g\cdot kg^{-1}$,盐穗木原材料水溶性 Ca^{2+} 含量为 1.67 $g\cdot kg^{-1}$,高碱蓬、野榆钱菠菜原材料水溶性 Ca^{2+} 含量较低,仅为 0.70 $g\cdot kg^{-1}$、0.38 $g\cdot kg^{-1}$(表 1);相应盐地碱蓬生物炭、盐角草生物炭水溶性 Ca^{2+} 含量最高,盐穗木生物炭次之,高碱蓬生物炭、野榆钱菠菜生物炭则最低(表 3)。

盐地碱蓬、盐角草原材料水溶性 Mg^{2+} 含量(11.88 $g\cdot kg^{-1}$、12.38 $g\cdot kg^{-1}$)显著高于高碱蓬、野榆钱菠菜及盐穗木原材料水溶性 Mg^{2+} 含量(1.03 $g\cdot kg^{-1}$、0.91 $g\cdot kg^{-1}$、1.31 $g\cdot kg^{-1}$),炭化所得生

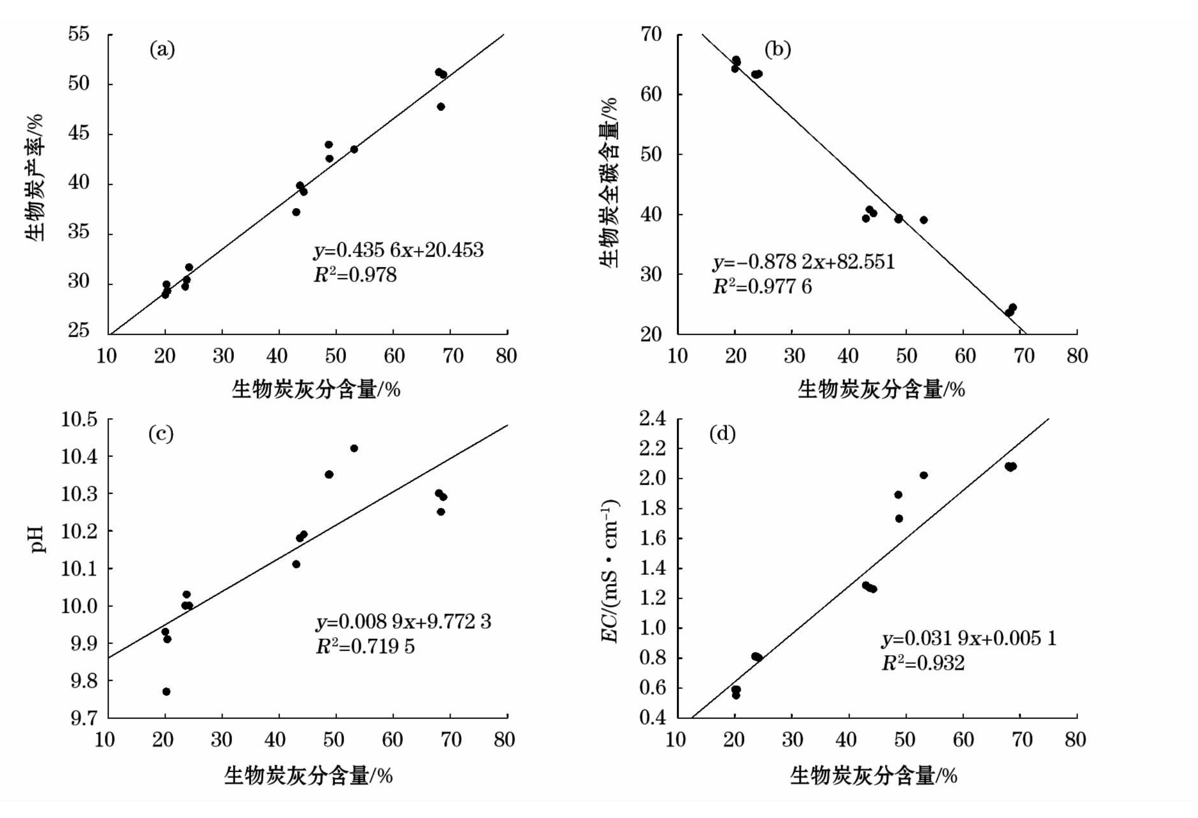


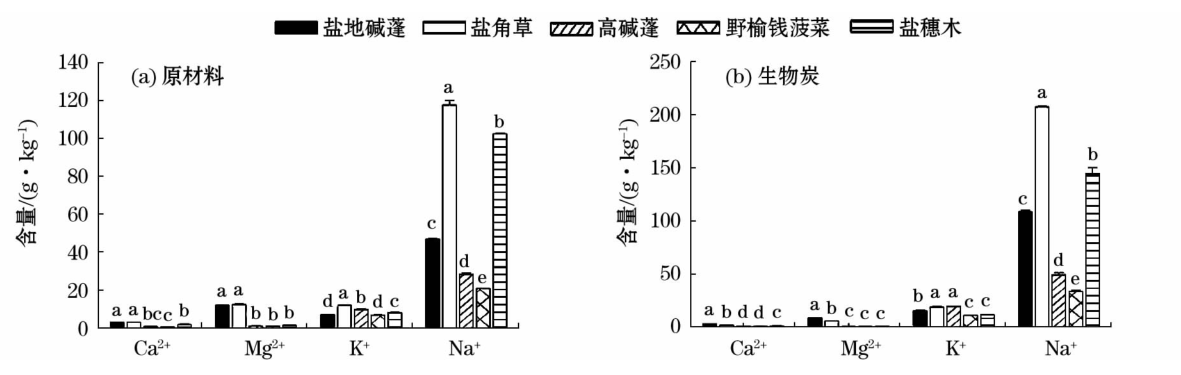
图 3 生物炭灰分含量与生物炭其他特性之间的关系

Fig. 3 Relationships between ash content and other properties of biochar

表 3 生物炭阳离子及全量氮磷钾含量

Tab. 3 Biochar cation and the contents of total nitrogen, phosphorus and potassium /(g·kg^{-1})

生物炭	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+	全氮	全磷	全钾
盐地碱蓬	3.22a	15.51b	8.76a	108.77c	6.40b	0.78c	17.67c
盐角草	1.60b	19.13a	5.90b	207.37a	6.97b	0.76c	21.19a
高碱蓬	0.73d	19.78a	0.33c	49.42d	5.29c	0.63d	19.11bc
野榆钱菠菜	0.76d	11.23c	0.29c	33.68e	6.92b	0.95b	19.06bc
盐穗木	1.10c	11.80c	0.64c	144.44b	13.91a	2.93a	19.30b



注:不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$),下同。

图 4 离子含量成分对比

Fig. 4 Compared results of ion content composition

物炭水溶性 Mg^{2+} 含量(8.76 g·kg^{-1}、5.90 g·kg^{-1})同样显著高于三者生物炭水溶性 Mg^{2+} 含量($P<0.05$)。盐角草、盐穗木原材料水溶性 Na^+ 含量较高,为 117.50 g·kg^{-1}、102.37 g·kg^{-1},盐地碱蓬原材料含量次之,为 46.67 g·kg^{-1},高碱蓬、野榆钱菠菜原材料水溶性 Na^+ 含量最低,分别为 28.28 g·kg^{-1}、20.82 g·kg^{-1},5 种原材料间水溶性 Na^+ 含量均达到差异性水平($P<0.05$);5 种生物炭中水溶性 Na^+ 含量依次为:盐角草生物炭 > 盐穗木生物炭 > 盐地碱蓬生物炭 > 高碱蓬生物炭 > 野榆钱菠菜生物炭。5 种原材料 500 ℃ 炭化制备生物炭,水溶性 K^+、Na^+ 含量均增加;生物炭水溶性 Mg^{2+} 含量降低;盐地碱蓬、高碱蓬、野榆钱菠菜生物炭水溶性 Ca^{2+} 含量增加,盐角草、盐穗木生物炭则降低(图 4)。同为碱蓬属的盐地碱蓬、高碱蓬无论是原材料还是生物炭离子含量具有显著差异性($P<0.05$)。

原材料全量氮磷钾含量决定生物炭中全量氮磷钾含量的保留情况(图 5)。5 种原材料中盐穗木原材料全氮含量最高(14.73 g·kg^{-1}),高碱蓬原材料含量最低(4.42 g·kg^{-1});同样,5 种生物炭中盐穗木生物炭全氮含量最高,高碱蓬生物炭含量最低。除盐角草外,炭化增加其他 4 种原材料全磷含量;盐穗木原材料与其他 4 种原材料相比,全磷含量最高,为 1.35 g·kg^{-1},达到显著差异水平($P<0.05$),盐

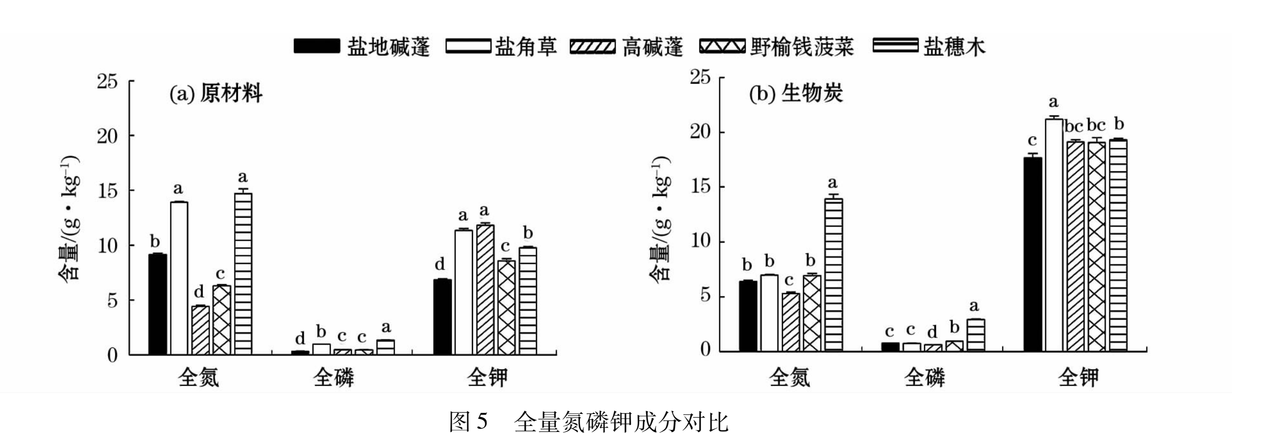


图 5 全量氮磷钾成分对比

Fig. 5 Compared results of total nitrogen, phosphorus and potassium composition

穗木生物炭全磷含量同样最高,为 2.93 $g \cdot kg^{-1}$,达到显著差异水平($P<0.05$)。炭化能有效增加 5 种原材料全钾含量,5 种生物炭全钾含量与原材料相比增加了 61.81% ~158.33%。生物炭全钾含量依次为:盐角草生物炭 > 盐穗木生物炭 > 高碱蓬生物炭 > 野榆钱菠菜生物炭 > 盐地碱蓬生物炭。对比分析发现,盐角草生物炭阳离子及全量氮磷钾含量总量显著高于其他 4 种生物炭。

3 讨 论

生产生物炭的原材料、生物质种类影响生物炭产率[26]。一般情况下原材料的木质素含量越高,生物炭的产率也越高[27-29]。而在本研究中发现,盐生植物生物炭产率与原材料灰分显著正相关($P<0.01$),这可能主要由于盐生植物原材料灰分含量高(7.51% ~35.68%),显著高于一般草本植物及木本植物[17-18],在利用盐生植物制备生物炭时,灰分较木质素更能影响生物炭产率。

原材料灰分、碳含量高,其裂解制备的生物炭的灰分、全碳含量也相应较高[30]。本研究中,5 种盐生植物原材料灰分、全碳含量具有差异性,盐角草灰分含量显著高于其他 4 种盐生植物,其生物炭灰分含量最高,为 68.73%;野榆钱菠菜全碳含量较高,其生物炭全碳含量高达 65.16%,显著高于其他 4 种生物炭。生物炭碳含量越高,灰分含量就越低,与以往研究结果一致[26]。生物炭之所以呈碱性,是因其含有一定量灰分,Na、K、Ca、Mg 等以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中,溶于水后呈碱性[31],且灰分含量越高碱性越强。而盐生植物通过炭化后灰分含量增加,进而提高盐生植物体 pH、*EC* 值。5 种盐生植物生物炭灰分含量为 20.22% ~68.37%,因此,这 5 种盐生植物生物炭具有较强的碱性。

原材料中元素的含量决定了生物炭中元素含量的保有量[32-34]。Yuan 等[35]比较了由 9 种作物秸秆制备的生物炭的元素含量,发现 4 种豆科植物秸秆中 Ca、Mg 和 K 的含量高于 5 种非豆科植物残体,4 种豆科秸秆制备的生物炭中这些养分的含量也明显高于 5 种非豆科植物残体制备的生物炭。本研究中,生物炭在形成过程中同样会保留盐生植物阳离子、全量氮磷钾组分特征,但总氮由于燃烧与挥发的原因含量降低,水溶性 Ca^{2+}、Mg^{2+} 离子则在高温炭化时,会发生一定程度的固结作用,同样导致生物炭中其含量降低。不同盐生植物对不同盐分离子的吸收具有选择偏向性[36],针对不同盐生植物离子含量差异性,可根据所需要的生物炭离子及全量氮磷钾含量特征,有目的的选择不同种类盐生植物裂解炭化。另外,盐角草生物炭的阳离子含量显著高于其他 4 种盐生植物生物炭,这可能是其体内的灰分含量高于其他 4 种盐生植物的重要原因[16]。

4 结 论

(1) 盐生植物原材料灰分含量更能影响所制备生物炭的产率。

(2) 在一定程度上,盐生植物体中灰分、全碳氮磷钾以及阳离子含量大小能够影响生物炭物质组成。

(3) 炭化能显著增加生物质灰分含量,同时伴随着灰分增加,水溶性 Na^+、K^+ 等低价离子富集,含量增加,pH 和 *EC* 升高。

参考文献(References):

〔1〕 Sohi S P, Krull E, Lopezcapel E, et al. A review of biochar and its use and function in soil〔J〕. Advances in Agronomy, 2010, 105(1): 47-82.

〔2〕 Zhang L H, Xu C B, Champagne P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass〔J〕. Energy Conversion and Management, 2010, 51(5): 969-982.

〔3〕 袁金华,徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展〔J〕. 土壤,2012,44(4):541-547.〔Yuan Jinhua, Xu Renkou. Research progress of amelioration effects of biochars on acid soils〔J〕. Soils, 2012, 44(4): 541-547.〕

〔4〕 于天一,孙秀山,石程仁,等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展〔J〕. 生态学杂志,2014,33(11):3 137-3 143.〔Yu Tianyi, Sun Xiushan, Shi Chengren, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3 137-3 143.〕

〔5〕 Nguyen B T, Lehmann J, Hockaday W C, et al. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation〔J〕. Environmental Science and Technology, 2010, 44(9): 3 324-3 331.

〔6〕 Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil: Concepts and mechanisms〔J〕. Plant and Soil, 2007, 300: 9-20.

〔7〕 Lehmann J. Bio-energy in the black〔J〕. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(7): 381-387.

〔8〕 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究〔J〕. 水土保持学报,2013,27(2):101-104, 109.〔Wang Dandan, Zheng Jiyong, Yan Yonghao, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern

region of Ningxia［J］. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 101－104, 109.］

［9］ Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments［J］. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46(5): 437－444.

［10］ 陈温福,张伟明,孟军,等. 生物炭应用技术研究［J］. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83－89.［Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun, et al. Researches on biochar application technology［J］. Strategic Study of CAE, 2011, 13(2): 83－89.］

［11］ 王宏燕,王晓晨,张瑜洁,等. 几种生物质热解炭基本理化性质比较［J］. 东北农业大学学报, 2016, 47(5): 83－90.［Wang Hongyan, Wang Xiaochen, Zhang Yujie, et al. Comparison of biochars characteristics from biomass residues produced through slow pyrolysis［J］. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(5): 83－90.］

［12］ 吴志丹,尤志明,江福英,等. 不同温度和时间炭化茶树枝生物炭理化特征分析［J］. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 583－588.［Wu Zhidan, You Zhiming, Jiang Fuying, et al. Physico-chemical properties of tea-twig-derived biochars different in temperature and duration of pyrolysis［J］. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 583－588.］

［13］ Novak J M, Cantrell K B, Watts D W, et al. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks［J］. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(2): 330－343.

［14］ Liu Y L, He Z Q, Uchimiya M. Comparison of biochar formation from various agricultural by-products using FTIR spectroscopy［J］. Modern Applied Science, 2015, 9(4): 246－253.

［15］ Ozcimen D, Ersoy-Mericboyu A. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials［J］. Renewable Energy, 2010, 35(6): 1 319－1 324.

［16］ 赵振勇,张科,王雷,等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果［J］. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1 420－1 425.［Zhao Zhenyong, Zhang Ke, Wang Lei, et al. Desalination effect of halophytes in heavily salinized soil of Karamay, Xinjiang, China［J］. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1 420－1 425.］

［17］ 林益明,林鹏,王通. 几种红树植物木材热值和灰分含量的研究［J］. 应用生态学报, 2000, 11(2): 181－184.［Lin Yiming, Lin Peng, Wang Tong. Caloric values and ash contents of some mangrove woods［J］. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 181－184.］

［18］ 宁祖林,陈慧娟,王珠娜,等. 几种高大禾草热值和灰分动态变化研究［J］. 草业学报, 2010, 19(2): 241－247.［Ning Zulin, Chen Huijuan, Wang Zhuna, et al. A study on the dynamic change of gross caloric value and ash content of the several tall grasses［J］. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(2): 241－247.］

［19］ 岳燕. 耐盐植物生物质炭特性及对盐渍化土壤改良培肥的作用与机理［D］. 北京: 中国农业大学, 2017.［Yue Yan. The Characteristics of Biochar from Halophyte Plants and the Amelioration Effect and Its Mechanism on the Salt-affected Soil［D］. Beijing: China Agricultural University, 2017.］

［20］ 郭洋,盛建东,陈波浪,等. 3 种盐生植物干物质积累与养分吸收特征［J］. 干旱区研究, 2016, 33(1): 144－149.［Guo Yang, Sheng Jiandong, Chen Bolang, et al. Study on dry matter accumulation and nutriention absorption of three halophytes under artificial-planting condition［J］. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 144－149.］

［21］ 罗煜,赵立欣,孟海波,等. 不同温度下热裂解芒草生物质炭的理化特征分析［J］. 农业工程学报, 2013, 29(13): 208－217.［Luo Yu, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Physio-chemical characterization of biochars pyrolyzed from miscanthus under two different temperatures［J］. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 208－217.］

［22］ 赵世翔,于小玲,李忠徽,等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响［J］. 环境科学, 2017, 38(1): 333－342.［Zhao Shixiang, Yu Xiaoling, Li Zhonghui, et al. Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: Influence on the soil active organic carbon［J］. Environmental Science, 2017, 38(1): 333－342.］

［23］ 李飞跃,汪建飞,谢越,等. 热解温度对生物质炭碳保留量及稳定性的影响［J］. 农业工程学报, 2015, 31(4): 266－271.［Li Feiyue, Wang Jianfei, Xie Yue, et al. Effects of pyrolysis temperature on carbon retention and stability of biochar［J］. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 266－271.］

［24］ Zielinska A, Oleszczuk P, Charmas B, et al. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic［J］. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 112: 201－213.

［25］ 鲍士旦. 土壤农化分析［M］. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.［Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis［M］. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.］

［26］ Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use［J］. Transactions of the Asabe, 2008, 51(6): 2 061－2 069.

［27］ Cao X F, Zhong L X, Peng X W, et al. Comparative study of the pyrolysis of lignocellulose and its major components: Characterization and overall distribution of their biochars and volatiles［J］. Bioresource Technology, 2014, 155: 21－27.

［28］ Zhao L, Cao X, Masek O, et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures［J］. Journal of Hazardous Materials, 2013, 256: 1－9.

［29］ Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review［J］. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 403－427.

［30］ Abdullah H, Wu H W. Biochar as a fuel: 1. Properties and grindability of biochars produced from the pyrolysis of mallee wood under slow-heating conditions［J］. Energy and Fuels, 2009, 23(8): 4 174－4 181.

［31］ 谢祖彬,刘琦,许燕萍,等. 生物炭研究进展及其研究方向［J］.

土壤,2011,43(6):857－861.〔Xie Zubin,Liu Qi,Xu Yanping,et al. Advances and perspectives of biochar research〔J〕. Soils,2011,43(6):857－861.

〔32〕 Inyang M,Gao B,Pullammanappallil P,et al. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse〔J〕. Bioresource Technology,2010,101(22):8 868－8 872.

〔33〕 Liu Z G,Zhang F S. Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass〔J〕. Journal of Hazardous Materials,2009,167(1－3):933－939.

〔34〕 王怀臣,冯雷雨,陈银广. 废物资源化制备生物质炭及其应用的研究进展〔J〕. 化工进展,2012,31(4):907－914.〔Wang Huaichen,Feng Leiyu,Chen Yinguang. Advances in biochar production from wastes and its applications〔J〕. Chemical Industry and Engineering Progeress,2012,31(4):907－914.〕

〔35〕 Yuan J H,Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol〔J〕. Soil Use and Management,2011,27(1):110－115.

〔36〕 郭洋,陈波浪,盛建东,等. 几种一年生盐生植物的吸盐能力〔J〕. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):269－276.〔Guo Yang,Chen Bolang,Sheng Jiandong,et al. Salt absorption capacities of several annul halophytes〔J〕. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2015,21(1):269－276.〕

Biochar Yield and Physicochemical Properties of Five Halophyte Species

MAO Ming-yue[1,2], ZHAO Zhen-yong[1], WANG Shou-le[1,2], TIAN Chang-yan[1], ZHANG Ke[1], GONG Jiang-ping[3], ZHANG Zheng[3], JING Wei-min[1]

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology*, *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
3. *Karamay City Architecture Planning and Design* (*Institution*) *Co. Ltd*, *Karamay* 834000, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: The purposes of this research was to figure out the difference of biochar yield and physicochemical properties among five halophyte species, i. e. the *Suaeda salsa*, *Salicornia europaea*, *Suaeda altissima*, *Atriplex aucheri* and *Halostachys caspica* under 500 ℃ carbonization condition. The results showed that the biochar yield was positively correlated with the ash content of raw material, but negatively correlated with the lignin content of raw material ($P<0.01$). There was a significant correlation between the raw material and the biochar in ash content and total carbon content ($P<0.01$). In addition, the contents of elements in the raw materials determined the amount of elemental content in biochar. Noticeably, carbonization increased effectively the ash content in five halophyte species, it was increased by 132.45% in *S. salsa*, 91.62% in *S. europaea*, 121.79% in *S. altissima*, 169.24% in *A. aucheri*, and 67.22% in *H. caspica*, respectively. Besides, the amount of sodium and potassium ions abstracted by distilled water was increased with the increase of ash content. Moreover, carbonization could effectively increase the pH (70.76%－82.33%) and *EC* (68.19%－144.96%) values of halophyte species. This study could be referred in researching the biochar yield and improving acidic soil by the biochar of halophytes.

Key words: halophyte; biochar; yield; ash; physicochemical property